

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Р.Р. ВАРДАНЯН*, Н.К. БАДАЛЯН, Д.С. ДАВТЯН

Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

*e-mail: ruben.vardanyan@polytechnic.am

(Поступила в редакцию 30 января 2026 г.)

В работе исследуются характеристики гибридных солнечных фотоэлектрически-тепловых (ФЭТ) преобразовательных модулей, которые по сравнению с обычными солнечными фотоэлектрическими модулями являются более энергоэффективными, за счет охлаждения солнечных элементов путем отвода тепла от нагретых солнечных элементов, а также получением дополнительной тепловой энергии. Показано, что при низких температурах окружающей среды, ниже некоторого критического значения, температура солнечных элементов ФЭТ модуля может быть выше температуры элементов обычного фотоэлектрического модуля (обратный процесс). Исследуется значение критической температуры окружающей среды для различных типов конструкций ФЭТ модулей (остеклённые, неостеклённые, с теплоизолированным и без теплоизолированного заднего слоя). Экспериментально показано, что критическая температура для ФЭТ модуля для модуля без теплоизолированного слоя составляет 21°C, а с теплоизолированным слоем 25°C. Для устранения негативного эффекта нагрева солнечных элементов необходимо учитывать рабочие температуры окружающей среды и выбирать соответствующие конструкции фотоэлектрических модулей и способы отвода тепла.

1. Введение

Использование солнечной энергии имеет решающее значение для сдерживания изменения климата, снижения зависимости от ограниченных запасов ископаемого топлива и достижения энергетической независимости. Основными существующими технологиями использования солнечного излучения являются фотоэлектрическое (ФЭ) преобразование света непосредственно в электричество и тепловое преобразование солнечных лучей в тепло.

Главная проблема солнечной энергии заключается в эффективном сборе этой энергии и её экономически выгодном преобразовании в другие полезные формы. Для повышения эффективности, а также для увеличения срока службы ФЭ модулей, важно снижать рабочие температуры модулей. Хорошо известно, что в фотоэлектрических солнечных элементах, в основном изготовленных из кремния, большая часть поглощённого солнечного излучения (около 80%) не преобразуется в электричество, а способствует повышению температуры солнечных элементов, тем самым снижая их электрическую эффективность. Это неотъемлемый недостаток солнечных элементов — снижение производительности из-

за температуры. Повышенная рабочая температура ФЭ модулей также снижает срок их службы.

Для решения этой проблемы были разработаны различные технологии охлаждения, среди которых разработка гибридных фотоэлектрически-тепловых (ФЭТ) систем является перспективным решением [1–4]. Солнечный гибридный ФЭТ коллектор — это новая технология с высокой вероятностью стать эффективным методом производства электрической и тепловой энергии в ближайшем будущем. Гибридный ФЭТ модуль сочетает солнечный элемент, который преобразует солнечное излучение в электричество, с солнечным тепловым коллектором, который улавливает оставшуюся тепловую энергию и отводит тепло от солнечного элемента. В гибридных ФЭТ системах за счёт охлаждения солнечных элементов увеличивается выработка электроэнергии, а отводимое тепло используется, тем самым максимизируя отдачу от доступного солнечного излучения (см. рис.1).

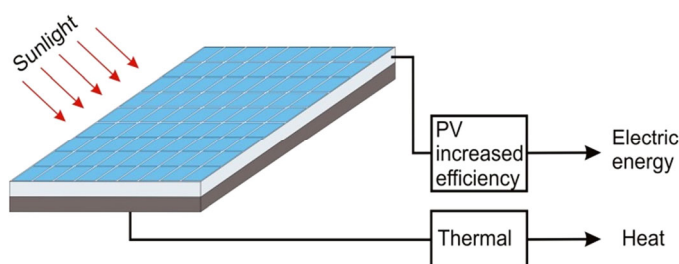


Рис.1. Гибридный фотоэлектрически-тепловой (ФЭТ) модуль.

Таким образом, фотоэлектрические и тепловые системы представляют собой двойные солнечные коллекторы с двумя полезными источниками энергии от одной системы (два в одном). По сравнению с обычными отдельными фотоэлектрическими и тепловыми системами, они обладают следующими преимуществами: улучшенная выработка электроэнергии — больше электроэнергии, чем в эквивалентной традиционной ФЭ системе; меньшая требуемая площадь крыши; повышенная эффективность системы за счёт одновременной выработки электрической и тепловой энергий; повышенная надёжность и срок службы ФЭ модулей за счёт снижения рабочей температуры модулей.

Проведено множество научных исследований, посвящённых изучению свойств солнечных гибридных ФЭТ коллекторов и систем [1–9]. Однако влияние температуры окружающей среды на характеристики ФЭТ коллекторов до конца не исследовано. Разработаны различные конструкции ФЭТ коллекторов: с покрытой (остеклённой) поверхностью, без покрытия (неостеклённые), с задним изоляционным слоем и без заднего изоляционного слоя. Во всех этих случаях тепловые возможности ФЭТ системы и её взаимодействие с окружающей средой различны. В зависимости от типа конструкции ФЭТ модуля эффект охлаждения солнечных элементов при разных температурах окружающей среды различен. Как показано в [10], существует критическая температура окружающей среды, ниже которой рабочая температура солнечных элементов гибридного ФЭТ коллектора выше по сравнению с температурой элементов обычного ФЭ модуля. Таким образом, основное преимущество ФЭТ системы при этих низких

температурах не реализуется. Значение указанной критической температуры в значительной степени зависит от конструкции ФЭТ системы, что необходимо учитывать при проектировании таких систем.

В настоящей работе исследуются характеристики различных гибридных ФЭТ систем в зависимости от температуры окружающей среды. Путём сравнения рабочих температур ФЭТ и ФЭ модулей анализируются характеристики различных гибридных ФЭТ систем.

2. Рабочие температуры ФЭТ и ФЭ модулей

ФЭТ системы, как правило, изготавливаются путём интеграции ФЭ модулей с тепловым коллекторным модулем с циркуляцией воды или воздуха. Существуют также системы, состоящие из материала с фазовым переходом или термоэлектрического генератора. Рассмотрим общий гибридный ФЭТ модуль, состоящий из ФЭ модуля с водяным тепловым коллектором, прикреплённым к нижней стороне ФЭ модуля (см. рис.2).

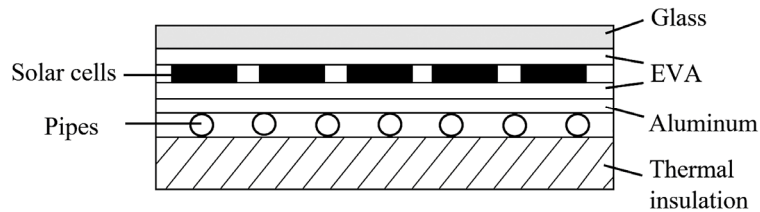


Рис.2. Гибридный ФЭТ модуль с теплоизолирующей задней панелью.

Рабочую температуру солнечных элементов гибридного ФЭТ модуля можно определить с помощью формулы [10]:

$$T_{PV/T} = \frac{1}{K1+K2} [F(\tau\alpha) + K1 T_{in} + K2 T_{amb}], \quad (1)$$

где $K1 = 2mC / AS$, $K2 = FU / G$, m — масса воды в накопительном баке, C — теплоёмкость жидкости, A — площадь солнечного ФЭТ коллектора, принимающего солнечные лучи, S — энергия солнечного излучения на квадратный метр, F — коэффициент отвода тепла ФЭТ коллектора, $\tau\alpha$ — коэффициент эффективной светопрозрачности покрытия τ и поглощательной способности коллектора α , U — общий коэффициент тепловых потерь коллектора, G — интенсивность солнечного излучения на единицу поверхности, T_{in} — температура на входе ФЭТ коллектора, T_{amb} — температура окружающей среды.

В соответствии с формулой (1), температура солнечного элемента зависит от всех тепловых параметров модуля. В свою очередь, все эти параметры зависят от конструкции ФЭТ коллектора.

Одной из основных целей применения гибридных ФЭТ коллекторов является снижение рабочей температуры солнечных элементов. Для анализа данного охлаждающего эффекта целесообразно сравнить температуру гибридного ФЭТ коллектора с температурой обычного ФЭ модуля при различных погодных условиях, то есть под воздействием различных температур окружающей среды.

Температура солнечных элементов в ФЭ модулях может быть рассчитана на основе NOCT (Nominal Operating Cell Temperature — номинальная рабочая

температура элемента). NOCT определяется как температура, достигаемая элементами модуля с разомкнутой цепью в стандартной эталонной среде, определяемой следующим образом: солнечное излучение 800 Вт/м^2 , температура окружающей среды 20°C , скорость ветра 1 м/с и тип монтажа — с открытой тыльной стороной. Лучший модуль работает при NOCT 33°C , худший — при 58°C , а типичный модуль — при 48°C , соответственно. Приблизительное выражение для расчёта температуры элемента приведено в работе [11]:

$$T_{PV} = T_{amb} + G \frac{NOCT-20}{800}. \quad (2)$$

Таким образом, температура солнечного элемента в ФЭ модуле T_{PV} линейно возрастает с увеличением температуры окружающей среды, при этом наклон равен 1. Следует отметить, что в соответствии с уравнением (1) температура элементов в ФЭТ модуле также линейно возрастает с температурой окружающей среды, однако наклон меньше 1, поскольку он равен $1 / (1 + K1 / K2)$. Это означает, что существует точка пересечения этих двух прямых. Значение температуры окружающей среды, при котором $T_{PV} = T_{PVТ}$, мы называем критическим. Ниже этого значения температура элементов в гибридном ФЭТ модуле выше, чем в обычном ФЭ модуле [10].

Зависимости температуры солнечных элементов в гибридном ФЭТ модуле $T_{PVТ}$ и ФЭ модуле T_{PV} от температуры окружающей среды, построенные по формулам (1) и (2), представлены на рис.3.

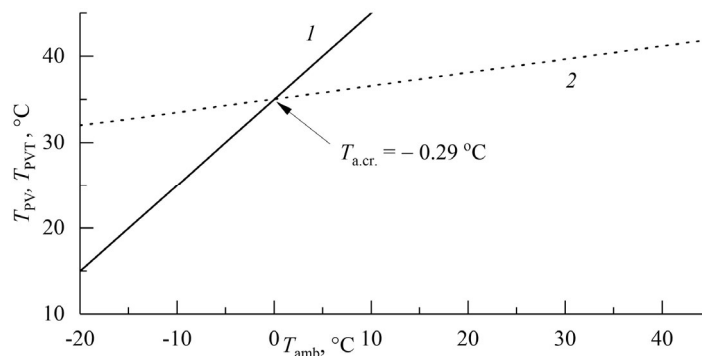


Рис.3. Зависимость температур солнечных элементов ФЭ модуля и остеклённого ФЭТ коллектора от температуры окружающей среды ($G = 1000 \text{ Вт/м}^2$, NOCT = 48°C , ёмкость бака ФЭТ системы составляет 100 л , $A = 2 \text{ м}^2$, $T_{in} = 15^\circ\text{C}$, $F(\tau\alpha) = 0.68$, $FU = 4.9 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$ [12]), 1 — T_{PV} , 2 — $T_{PVТ}$.

Из рис.3 видно, что из-за различных угловых коэффициентов двух прямых (1 и 0.16 для T_{PV} и $T_{PVТ}$, соответственно) существует точка пересечения при $T_{amb} = -0.29^\circ\text{C}$. Эта точка является критической ($T_{a.cr.}$). Когда температура окружающей среды ниже $T_{a.cr.}$, элементы в ФЭТ коллекторе нагреваются сильнее, чем элементы обычного ФЭ модуля. При низких температурах окружающей среды, при $T_{amb} < T_{a.cr.}$, происходит обратный процесс, и электрический КПД ФЭТ коллектора становится ниже по сравнению с обычным ФЭ модулем. Эта точка пересечения определяет минимально рекомендуемую температуру для применения гибридной ФЭТ системы. Значение критической температуры зависит от тепловых параметров гибридных ФЭТ модулей, которые определяются типом конструкции ФЭТ коллекторов.

С использованием формул (1) и (2) построены зависимости рабочих температур солнечных элементов в ФЭ модуле (T_{PV}), гибридных ФЭТ модулях без теплоизолирующего заднего слоя (T_{PVT}) и с задней теплоизоляцией ($T_{PVT+B.Sh.}$) от температуры окружающей среды (см. рис.4).

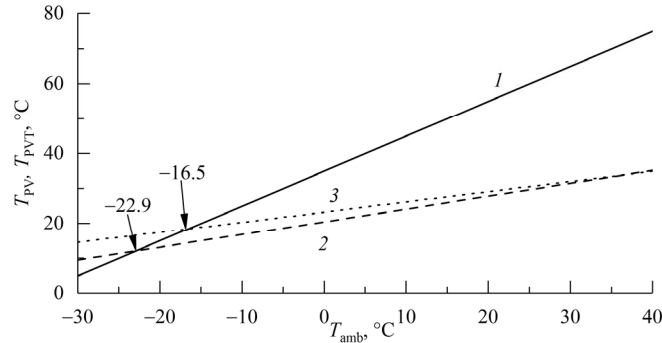


Рис.4. Температуры солнечных элементов гибридных ФЭТ модулей без теплоизолирующей задней панели (T_{PVT}) и с теплоизолирующей задней панелью ($T_{PVT+B.Sh.}$), а также температура элементов в обычном фотоэлектрическом модуле (T_{PV}) в зависимости от температуры окружающей среды T_{amb} (G , $NOCT$, емкость бака ФЭТ системы, A и T_{in} те же, что на рис.3, для неостекленной плоской поверхности без теплоизолятора $F(\tau\alpha) = 0.45$, $FU = 15 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ C$ и для неостекленной плоской поверхности PVT+B.Sh. с теплоизолятором $F(\tau\alpha) = 0.45$, $FU = 10.15 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ C$ [13]): 1 — T_{PV} , 2 — T_{PVT} , 3 — $T_{PVT+B.Sh.}$.

Из рис. 4 видно, что рабочий диапазон температуры T_{PVT} окружающей среды для солнечных элементов гибридных ФЭТ модулей без теплоизолирующего заднего слоя шире, чем для гибридных ФЭТ модулей ($T_{PVT+B.Sh.}$) с теплоизолирующим задним слоем. Таким образом применение теплоизолирующего заднего слоя повышает температуру гибридного ФЭТ модуля и, следовательно, увеличивает тепловую мощность ФЭТ системы, однако электрическая эффективность солнечных элементов снижается при низких температурах окружающей среды.

Точки пересечения линий T_{PVT} (без теплоизолирующего заднего слоя) и $T_{PVT+B.Sh.}$ (с теплоизолирующим задним слоем) с характеристикой обычного ФЭ модуля T_{PV} находятся при $T_{amb} = -22.9^\circ C$ и $T_{amb} = -16.5^\circ C$, соответственно. Это критические температуры. Ниже этих температур гибридные ФЭТ модули оказываются теплее, чем обычный ФЭ модуль (обратный процесс), и, следовательно, электрическая эффективность ФЭТ модуля становится ниже эффективности ФЭ модуля. Можно сделать вывод, что ФЭТ модуль без теплоизолирующего заднего слоя может использоваться в более широком диапазоне температур окружающей среды, чем ФЭТ модуль с теплоизолирующим задним слоем.

Для сравнения рабочих температур солнечных элементов в неостеклённых и остеклённых плоских ФЭТ коллекторах, а также в ФЭТ коллекторах трубчатого вакуумного типа рассчитывались температуры этих систем по формуле (1). Для расчетов используются тепловые параметры, указанные в табл.1.

Полученные зависимости температуры, а также температура ФЭ модуля с открытой тыльной стороной в зависимости от температуры окружающей среды представлены на рис.5.

Как и ожидалось, критическая рабочая температура для неостеклённого

Табл.1. Тепловые параметры различных типов ФЭТ коллекторов, используемых для расчёта температур солнечных элементов

Тип ФЭТ коллектора	$F, \tau\alpha$	$FU, \text{Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	Литература
Неостеклённый плоский	0.45	10.15	[12]
Остеклённый плоский	0.68	4.9	[11]
Вакуумная трубка	0.58	0.7	[11]

ФЭТ коллектора меньше, и, следовательно, рабочий диапазон неостеклённой ФЭТ системы является максимальным. Более высокие критические температуры имеют остеклённые ФЭТ коллекторы, а максимальное значение критической температуры имеет ФЭТ коллектор трубчатого вакуумного типа.

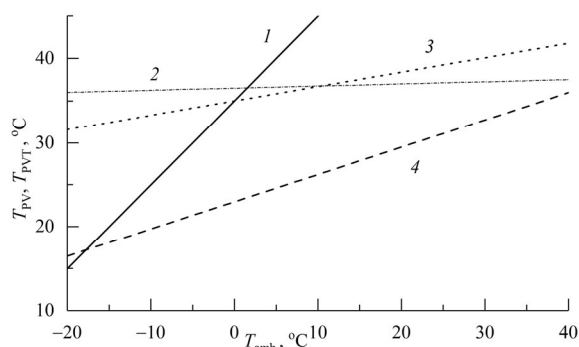


Рис.5. Зависимость температур солнечных элементов ФЭ модуля и ФЭТ коллекторов различных типов от температуры окружающей среды (условия эксперимента те же, что на рис.3 [11]), 1 — T_{PV} , 2 — T_{PVT} (вакуумная трубка), 3 — T_{PVT} (остеклённый плоский), 4 — T_{PVT} (неостеклённый плоский).

3. Экспериментальная установка

Влияние теплоизолирующего заднего слоя на рабочую температуру гибридного ФЭТ модуля исследовано экспериментально. Для сравнения также измерялась температура обычного ФЭ модуля в тех же условиях. Эксперименты проводились в естественных условиях, на открытой площадке исследовательской лаборатории «Полупроводниковые фотоэлектрические устройства» Национального политехнического университета Армении.

ФЭТ модуль изготовлен путём крепления теплового коллектора к задней стороне обычного ФЭ модуля (неостеклённого типа). С этой целью, а также для эталонного ФЭ модуля использовались поликристаллические ФЭ модули мощностью 275 Вт, произведённые в Армении. Гибридный ФЭТ модуль и ФЭ модуль размещались рядом друг с другом с углом наклона 30° к горизонту.

Измерения проводились для ФЭТ системы с теплоизолирующим задним слоем и без него на одном и том же ФЭТ модуле. Циркуляция воды в ФЭТ модуле осуществлялась с помощью принудительной циркуляции при расходе воды 1.5 л/мин. Измерялись следующие температуры: T_{PVT} , $T_{PVT+B.Sh.}$, T_{PV} и T_{amb} .

Для проведения измерений была разработана автоматизированная система.

В состав устройства входят микроконтроллер Arduino, датчики температуры типа DS18B20, модуль карты Micro SD для сохранения измеренных данных, а также блок питания.

Измерения выполнялись согласно заранее написанному программному коду для микроконтроллера. Измерения проводились с интервалом 20 с. Измеренные данные хранились на карте памяти Micro SD, откуда они импортировались в компьютер для обработки и анализа. Блок-схема экспериментальной установки с подключением датчиков температуры представлена на рис.6.

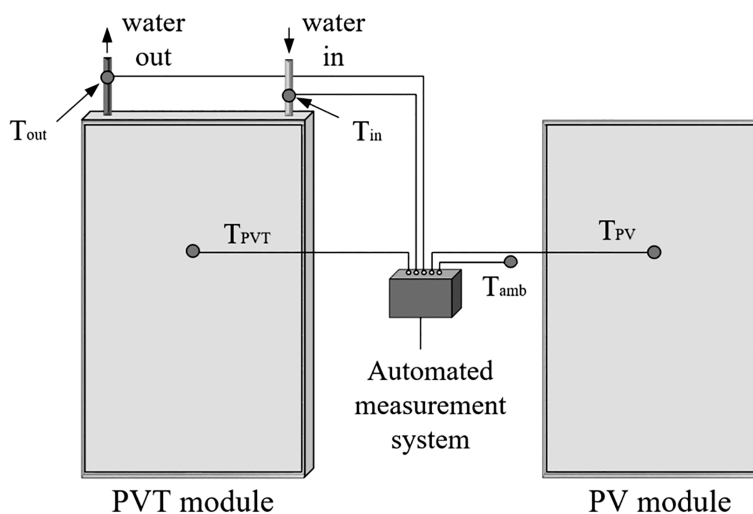


Рис.6. Блок-схема экспериментальной установки.

4. Результаты измерений и их обсуждение

В течение дня было проведено 715 измерений температур ФЭТ модуля без теплоизолирующего заднего слоя, а также температуры эталонного ФЭ модуля и температуры окружающей среды. Линейные аппроксимации измеренных зависимостей температуры ФЭТ модуля без заднего слоя и эталонного ФЭ модуля от температуры окружающей среды приведены на рис.7а.

Зависимости T_{PV} и T_{PVT} от T_{amb} (линия 1 и 2 на рис.7а) показывают, что средняя температура гибридного ФЭТ модуля меньше по сравнению с температурой эталонного ФЭ модуля. Наклон линии для T_{PVT} меньше (1.116), чем угловой коэффициент линии, построенной для T_{PV} (1.6585).

Таким образом, можно сделать вывод, что в ФЭТ модуле с заданным режимом охлаждения (принудительная циркуляция воды 1.5 л/мин) средняя температура солнечных элементов меньше, чем температура эталонного ФЭ модуля. Однако при низких температурах окружающей среды, ниже примерно 21°C (критическая температура окружающей среды), температура элементов в ФЭТ модуле выше, чем в ФЭ модуле (обратный процесс). Для устранения этого негативного эффекта должен применяться соответствующий режим охлаждения для ФЭТ модуля.

Другая серия экспериментов с 740 измерениями температур проводилась,

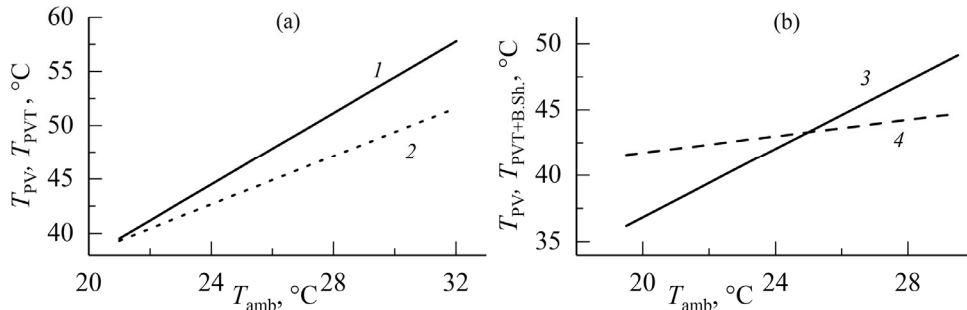


Рис.7. (а) Зависимости температур ФЭТ модуля без теплоизоляционной задней панели ($T_{PVT} = 1.116T_{amb} + 15.918$) и ФЭ модуля ($T_{PV} = 1.6585T_{amb} + 4.7267$) от температуры окружающей среды T_{amb} , (b) — зависимости температур ФЭТ модуля с теплоизолирующим задним слоем ($T_{PVT+B.Sh.} = 0.3145T_{amb} + 35.449$) и ФЭ модуля ($T_{PV} = 1.291T_{amb} + 11.05$) от температуры окружающей среды T_{amb} , 1 и 3 — T_{PV} , 2 — T_{PVT} , 4 — $T_{PVT+B.Sh.}$.

когда ФЭТ модуль был покрыт теплоизолирующим задним слоем. Измерялись также температуры эталонного ФЭ модуля и окружающей среды. Зависимости температуры ФЭТ модуля с задним слоем $T_{PVT+B.Sh.}$ и эталонного ФЭ модуля T_{PV} от температуры окружающей среды представлены на рис.7б.

Линейная аппроксимация измеренных T_{PV} и $T_{PVT+B.Sh.}$ (линия 3 и 4 на рис.7б) показывает, что в этом случае наклон линии для гибридного модуля $T_{PVT+B.Sh.}$ меньше (0.3145), чем угловой коэффициент линии, построенной для эталонного ФЭ модуля T_{PV} (1.291).

По сравнению с ФЭТ модулем без заднего слоя (рис.7а) видно, что точка пересечения линейных аппроксимаций (критическая температура окружающей среды) происходит при более высокой температуре окружающей среды ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$). Следует отметить, что аналогичный результат получен на теоретически построенной диаграмме (рис.4). Это означает, что при высоких температурах окружающей среды (выше 25°C) средняя температура ФЭТ модуля с задним слоем меньше, чем температура эталонного ФЭ модуля. Но при температуре окружающей среды ниже 25°C ФЭТ модуль нагревается сильнее, чем эталонный ФЭ модуль (обратный процесс). Этот негативный эффект необходимо учитывать при разработке ФЭТ модулей и гибридных ФЭТ систем.

5. Заключение

Существует критическое значение температуры окружающей среды, ниже которого рабочая температура солнечных элементов гибридного ФЭТ коллектора выше, чем температура элементов обычного ФЭ модуля. При низких температурах окружающей среды, меньших, чем критическое значение, происходит обратный процесс, и электрическая эффективность ФЭТ коллектора становится ниже по сравнению с обычным ФЭ модулем. Критическая температура окружающей среды для гибридного ФЭТ модуля типа вакуумной трубки выше (малый диапазон рабочих температур), чем критическая температура остеклённого ФЭТ модуля (средний диапазон рабочих температур) и критическая температура неостеклённого ФЭТ модуля (широкий диапазон рабочих температур). Критическая температура для гибридного ФЭТ модуля без теплоизолирующего заднего слоя составляет 21°C и 25°C для ФЭТ модуля с теплоизолирующим слоем. Для

преодоления негативного эффекта нагрева солнечных элементов ФЭТ модулей (обратный процесс) и расширения рабочих температур необходимо учитывать рабочие температуры окружающей среды, выбрать соответствующие конструкции ФЭТ модулей и режимы отвода тепла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **M. Lammle, M. Herrando, G. Ryan.** Basic Concepts of PVT Collector Technologies, Applications and Markets. IEA SHC Task 60/PVT Systems, 1–25, 2020.
2. **M. Samykano.** Buildings, **13**, 1950 (2023).
3. **Z.U. Abdin, A. Rachid.** Energies, **14**, 1205 (2021).
4. **A. Mellor, D.A. Alvarez, I. Guarracino, A. Ramos, A.R. Lacasta, L.F. Llin, A.J. Murrell, D.J. Paul, D. Chemisana, C.N. Markides, N.J. Ekins-Daukes.** Solar Energy, **174**, 386 (2018).
5. **D. Zenhäusern, E. Banberger, A. Baggenstos.** Energy Systems with Photovoltaic-Thermal Solar Collectors, Final report, Swiss Energy, Bern, Switzerland, 1–89, 2017.
6. **C.A. Ramos, A.N. Alcaso, A.J. Cardoso.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, **354**, 1 (2019).
7. **S.H. Bandaru, V. Becerra, S. Khanna, J. Radulovic, D. Hutchinson, R. Khusainov.** Energies, **14**, 1 (2021).
8. **M.G. Noxpanco, J. Wilkins, S. Riffat.** Future Cities and Environment, **6**, 9 (2020).
9. **S. Diwania, S. Agrawal, A. Siddiqui, S. Singh.** Intern. J. Energy and Environmental Engineering, **11**, 33 (2020).
10. **R.R. Vardanyan, V.K. Dallaqyan, M.G. Travajyan.** J. Contemp. Phys., **55**, 339 (2020).
11. **R.G. Ross.** Flat-Plate Photovoltaic Array Design Optimization, Proceedings of the 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, 1126–1132, 1980.
12. RETScreen International, Clean Energy Support Center: Solar Water Heating Project Analysis, Canada. https://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/mitigation/Module_5/Module_5_1/b_tools/RETScreen/Manuals/Solar_Water_Heating.pdf.
13. **J.H. Kim, J.T. Kim.** Intern. J. Photoenergy, **2012**, 1 (2012).

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF HYBRID PHOTOVOLTAIC-THERMAL SOLAR ENERGY CONVERTERS

R.R. VARDANYAN, N.K. BADALYAN, D.S. DAVTYAN

This paper examines the performance of hybrid solar photovoltaic-thermal (PVT) modules, which are more energy efficient than conventional solar photovoltaic modules due to the ability to cool the solar cells by removing heat from the heated solar cells and by generating additional thermal energy. It is shown that at low ambient temperatures, below a certain critical value, the temperature of the solar cells in a PVT module can be higher than that of a conventional photovoltaic module (the reverse process). The critical ambient temperature is examined for various PVT module designs (glazed, unglazed, with and without a thermally insulated back layer). It is experimentally shown that the critical temperature for a PVT module without an insulated back layer is 21°C, while for a module with an insulated back layer it is 25°C. To eliminate the negative effect of solar cell heating, it is necessary to consider the operating ambient temperatures and to select appropriate PVT module designs and heat removal modes.